

Anales de Mecánica de la Fractura

TEXTO DE LAS COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL

**XXXV ENCUENTRO DEL
GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA**

Número 35

Málaga

14, 15 y 16 de marzo de 2018



Anales de Mecánica de la Fractura

Texto de las comunicaciones presentadas en el
**XXXV ENCUENTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE
FRACTURA**

14, 15 y 16 de marzo de 2018

Málaga

©ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA
Editado por la Secretaría del Grupo Español de Fractura

“Reservados todos los derechos para todos los países. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea electrónico o de cualquier otro, sin previa autorización escrita por parte de la Editorial”

I.S.S.N: 0213-3725
Fecha impresión: Marzo 2018

INDICE

CONFERENCIAS INVITADAS.....	12
TOWARDS A NEW UNDERSTANDING OF FATIGUE CRACK PROPAGATION D. Nowell, P. Qui	13
UNA METODOLOGÍA SISTEMÁTICA PARA LA MODELIZACIÓN PROBABILÍSTICA DE RESULTADOS DE FALLO EN FRACTURA Y FATIGA Alfonso Fernández Canteli, Enrique Castillo Ron	18
FRACTURA DE MATERIALES METÁLICOS.....	33
OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ENTALLA LATERAL PASANTE EN LA ESTIMACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA MEDIANTE PROBETAS SMALL PUNCH D. Andrés, R. Lacalle, A. Jaurrieta, J.A. Álvarez.....	34
ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRICCIÓN EN LOS ACEROS CORRUGADOS TEPCORE B. Hortigón, J.M. Gallardo, E.J. Nieto-García, F. Ancio, M.A. Herrera	40
FRACTURA EN MODO I Y MODO MIXTO DE PLACAS CON ENTALLA EN U DE DOS MATERIALES METÁLICOS CON COMPORTAMIENTO PLÁSTICO DIFERENCIADO. R.Sancho, D. Cendón, E. Alliu, F. Berto	46
INTEGRIDAD SUPERFICIAL Y VIDA EN FATIGA DE INCONEL 718 A. Martín-Meizoso, J.M. Martinez-Esnaola, P.J. Arrazola, A. Linaza,.....	52
MORPHOLOGY AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF LASER BEAM WELDING AA2024/AA7075 DISSIMILAR T-JOINTS P. Oliveira, A. Loureiro, J. Costa, J. Ferreira, L. Borrego	58
EFFECTO DEL HIDRÓGENO EN LA TENACIDAD A FRACTURA DEL ACERO 42CrMo4 TEMPLADO Y REVENIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS A. Zafra, L.B. Peral, F.J. Belzunce y C. Rodriguez	64
FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DE UN ACERO DE ALTA RESISTENCIA TEMPLADO Y REVENIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS A.Zafra, L.B. Peral, F.J. Belzunce e I. F. Pariente,	70
ANÁLISIS DEL EFECTO ENTALLA EN LA CURVA DE TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL DEL ACERO S690Q S.Cicero, T. García, V. Madrazo, F.T. IbáñezE Gutiérrez	76
ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE ROTURA EN PROBETAS ENTALLADAS DE ALUMINIO AL7075-T651 MEDIANTE EL USO DEL CONCEPTO DEL MATERIAL EQUIVALENTE COMBINADO CON EL CRITERIO DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN J.D. Fuentes, S. Cicero, F. Berto, A.R. Torabi, V. Madrazo, P. Azizi	82
COMPARATIVA ENTRE RESISTENCIAS, MEDIDAS Y ESTIMADAS DE UN ACERO ESTRUCTURAL MEDIANTE TRACCIÓN, FLEXIÓN Y DUREZA José Luis Ruiz Martín, Antonio Illana Martos, David Sales Lérida.....	88
LA RELACIÓN ENTRE LA LONGITUD DE ONDA DE LA PROBETA Y LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA ESTRICCIÓN BAJO CONDICIONES DINÁMICAS DE CARGA J. A. Rodríguez-Martínez, A. Godinger, Y. Rotbaum, A. Vaz-Romero, D. Rittel	92

OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ENTALLA LATERAL PASANTE EN LA ESTIMACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA MEDIANTE PROBETAS *SMALL PUNCH*

D. Andrés^{1*}, R. Lacalle, A. Jaurrieta¹, J.A. Álvarez¹

¹LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, España

* Persona de contacto: andresd@unican.es

RESUMEN

El ensayo *small punch* es una técnica de ensayo miniatura que permite la estimación de gran variedad de propiedades del material simplemente mediante el punzonado de probetas de reducidas dimensiones, de tan sólo 8 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor. Una de las caracterizaciones que más interés suscita es la estimación de las propiedades a fractura, algo difícilmente abordable mediante el empleo de otras metodologías experimentales de naturaleza no destructiva o cuasi-no-destructiva. Desde los orígenes de esta técnica en los 80 se han planteado diversas metodologías para conseguir dicho objetivo, entre las que destaca el empleo de probetas modificadas con entalla lateral pasante. El objetivo del presente trabajo es el análisis de la influencia de la geometría de dicha entalla, evaluando diferentes radios y longitudes de la misma en el acero S355J2. Por lo tanto, esta investigación conduce a la optimización de la geometría empleada, contribuyendo de manera significativa a la fiabilidad de las estimaciones de tenacidad a fractura mediante ensayos *small punch* y a su desarrollo como herramienta clave en evaluaciones de integridad estructural de componentes reales en presencia de fisuras.

PALABRAS CLAVE: Tenacidad a fractura, *small punch*, Ensayo miniatura, Entallas

ABSTRACT

The small punch test is a miniature testing technique that allows the estimation of a great variety of properties of the material by simply punching small specimens of only 8 mm-diameter and 0.5-mm thickness. One of the most interesting characterisations by means of this testing technique is the estimation of fracture properties, something nearly impossible to achieve by other non-destructive or quasi-non-destructive experimental methodologies. Since its origins in the 1980s, several methodologies have been proposed to achieve this goal, among which the use of modified pass-through notched specimens stands out. The objective of the present work is the analysis of the influence of the geometry of the aforementioned notch, evaluating different radii and lengths on S355J2 structural steel. Therefore, this research leads to the optimisation of the geometry employed, contributing significantly to the reliability of fracture toughness estimations by means of small punch tests and its development as a key tool in structural integrity assessments of real components presenting flaws.

KEYWORDS: Fracture toughness, small punch, Miniature test, Notches

1. INTRODUCCIÓN

La realización de evaluaciones de integridad estructural de componentes en presencia de defectos permite no sólo delimitar su margen a rotura, sino garantizar la optimización de su vida útil con criterios tolerantes al daño, teniendo en cuenta además las propiedades reales del material. Para poder realizar dichas evaluaciones se requiere la caracterización mecánica de los componentes, un elemento clave en el proceso. Tradicionalmente, ésta se ha realizado mediante procedimientos convencionales [1,2], los cuales requieren de volúmenes de material que pueden comprometer la integridad de la estructura o

incluso resultar imposibles de obtener, en el caso de geometrías complejas o de componentes de reducidas dimensiones. Para tratar de solucionar este problema, durante las últimas décadas se ha llevado a cabo un esfuerzo generalizado para desarrollar las técnicas de ensayo miniatura [3], que permiten realizar una caracterización alternativa. Entre ellas destaca el ensayo *small punch* (SP) [4], por el gran nivel de difusión alcanzado en las últimas tres décadas y por su elevado potencial, ya que puede ser empleado en la estimación de multitud de propiedades del material.

El ensayo SP consiste simplemente en el punzonado de una probeta plana de reducidas dimensiones (0.5 mm de espesor y 8 mm de diámetro) hasta rotura para estimar las propiedades del material. Dado el interés que dicho ensayo ha suscitado, tanto en la comunidad científica como en el sector industrial, cuenta ya con un código europeo con recomendaciones de tipo general [5] y actualmente se encuentra en proceso de estandarización [6], si bien siguen desarrollándose metodologías universales para la determinación de las propiedades de materiales metálicos.

El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de la técnica e incrementar su aceptación mediante la optimización de la entalla lateral pasante empleada en las estimaciones de la tenacidad a fractura. Para ello, se ha analizado el uso de diferentes radios y longitudes de la entalla, comprobando y analizando su influencia en un acero estructural ampliamente empleado en la industria.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Material

Se ha analizado un acero S355J2. Se trata de un acero estructural laminado en caliente, con un límite elástico de 374.6 MPa y una resistencia a tracción de 557.6 MPa [7]. Su tenacidad a fractura ha sido obtenida en este trabajo mediante el ensayo de tres probetas CT de 25 mm de espesor, de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM E1820-17^a [2], obteniendo un valor medio de tenacidad a fractura, K_{JIC} , de 350 MPa m^{1/2}.

La estimación de la tenacidad a fractura mediante los ensayos SP se ha realizado empleando probetas modificadas con una entalla lateral pasante. Este método permite introducir un defecto de tipo entalla en el material, de manera análoga a lo empleado en los ensayos convencionales, a partir del cual propaga una fisura durante el ensayo [8,9]. En este trabajo, para poder analizar la influencia de la geometría de la entalla, se han analizado defectos de radio 0 mm (fisuras) y de radio 0.15 mm (entalla), con longitudes aproximadas de 4 mm, 4.5 y 5 mm (medidas desde el extremo de la probeta), tal como se muestra en la Figura 1.

Se han empleado probetas cuadradas de 10x10 mm, puesto que presentan ventajas a la hora de mecanizarlas frente a las probetas de 8 mm de diámetro propuestas en CWA 15627:2007 [5]. Dado que la zona de proceso es exactamente la misma en ambos casos, el empleo de este tipo de probetas no influye en los resultados.

Las probetas han sido preparadas a partir de prismas en los que se ha creado la entalla previamente, mediante corte por hilo en el caso de las entallas y mediante fatiga en el caso de las fisuras. Dichos prismas han sido cortados en piezas de 0.55 mm de espesor en una cortadora de precisión, y posteriormente pulidos hasta

garantizar un espesor de 0.5 mm [5]. Tras este proceso, se ha corregido la longitud de la entalla mediante pulido para poder analizar la longitud deseada.

2.2. Dispositivo experimental

Los ensayos SP se han realizado de acuerdo a las recomendaciones de CWA 15627:2007 [5].

Para poder garantizar la correcta alineación de la entalla y garantizar la longitud ensayada, se ha desarrollado una nueva matriz para alojar a las probetas, tal como se muestra en la Figura 2. Se trata de un diseño novedoso, que permite adaptarse a la geometría de cada probeta. Al incorporar una mitad móvil, es posible ajustar la matriz a la longitud de cada probeta y evitar posibles holguras entre la matriz y la misma, minimizando las posibles desviaciones de la entalla durante el ensayo.

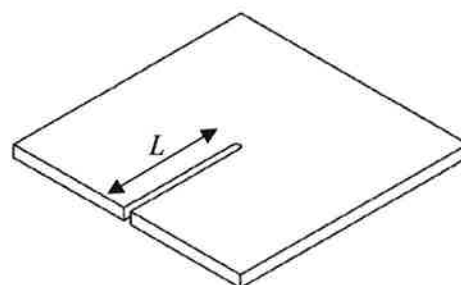


Figura 1. Esquema de las probetas SP modificadas para la estimación de la tenacidad a fractura, donde L es la longitud de la entalla.

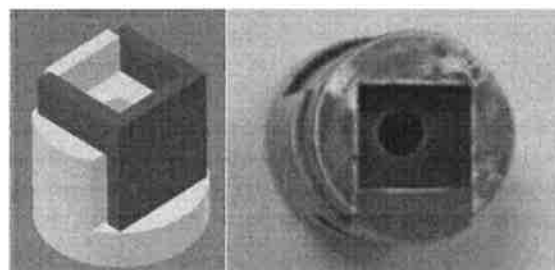


Figura 2. Matriz desarrollada para la realización de los ensayos.

2.3. Estimación de la tenacidad a fractura

Las estimaciones de tenacidad a fractura del acero S355J2 mediante el uso de entallas de radio 0.15 mm han sido realizadas de acuerdo a la metodología propuesta en [8,9], basada en el concepto de CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*). De acuerdo a dicha metodología, es posible relacionar el grado de enroscamiento de la entalla en el momento de la iniciación con la tenacidad a fractura del material, algo fácilmente realizable mediante el ensayo SP [8,9].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tal como se comprueba en la Figura 3, se puede observar una clara influencia de la geometría de la entalla en la curva Fuerza-Desplazamiento del punzón obtenida. Se puede apreciar la influencia del empleo de diferentes radios en la entalla, obteniendo en general mayores niveles de fuerza para un mismo desplazamiento cuanto menor es el radio de la entalla aplicada. Por otro lado, también se observa que la fuerza máxima alcanzada es dependiente de la longitud de la entalla, siendo mayor cuanto menor es la longitud de la entalla aplicada. Dada la similitud de los resultados, se estima que estos efectos se deben a la presencia de una mayor o menor cantidad de material en la zona de proceso del ensayo, alcanzando mayores valores de fuerza cuanto mayor es la cantidad de material disponible en la zona sometida a esfuerzos (mayor cuanto menor es el radio y mayor es la longitud de la entalla).

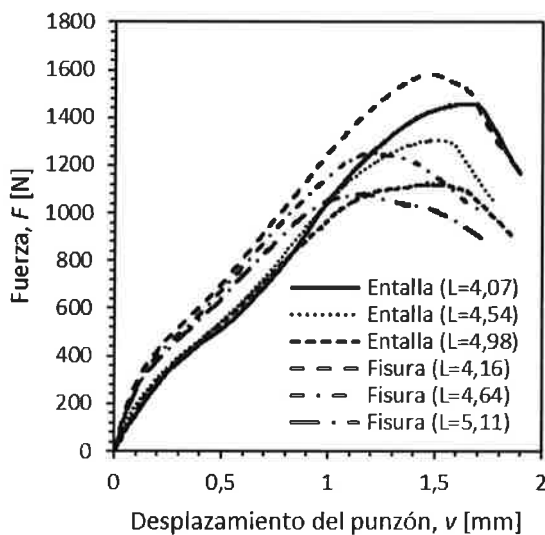


Figura 3. Curvas Fuerza-Desplazamiento del punzón obtenidas en los ensayos.

De acuerdo a la Figura 4, se observa que existe una relación lineal entre la fuerza máxima alcanzada durante el ensayo y la longitud del defecto analizado, independientemente del radio (fisura o entalla), a excepción del ensayo de menor longitud (radio 0 mm), que no se encuentra sobre dicha línea de tendencia. De acuerdo a la Figura 5.b), este efecto puede estar debido a la combinación de dos efectos: la aparición de una fisura en el fondo de la entalla tras el enromamiento, junto con una rotura posterior de la probeta sin efecto de la entalla, puesto que se observa como la fisura tiende a tomar forma de media luna, de manera similar a las probetas SP convencionales sin entalla.

Por otro lado, durante el análisis fractográfico de las probetas, se ha comprobado que no se produce un cambio en los micromecanismos de fractura debido a la geometría de la entalla. En la Figura 5 se pueden observar las probetas analizadas, destacando la propagación de

una fisura a partir de la entalla en todos los ensayos. También se puede observar un mayor grado de enromamiento de la entalla en función de la geometría de la misma, tanto para las entallas de radio 0.15 mm como para las fisuras (radio 0 mm), siendo mayor cuanto mayor es la longitud de la entalla.

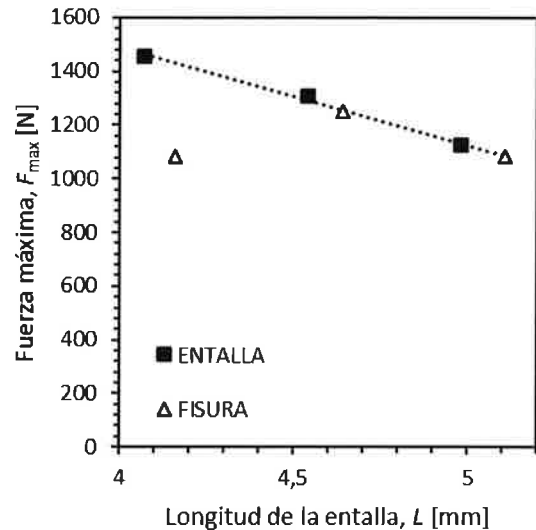


Figura 4. Fuerza máxima alcanzada durante los ensayos en función de la longitud del defecto empleado, tanto para radio 0 mm (fisura), como para radio 0.15 mm (entalla).

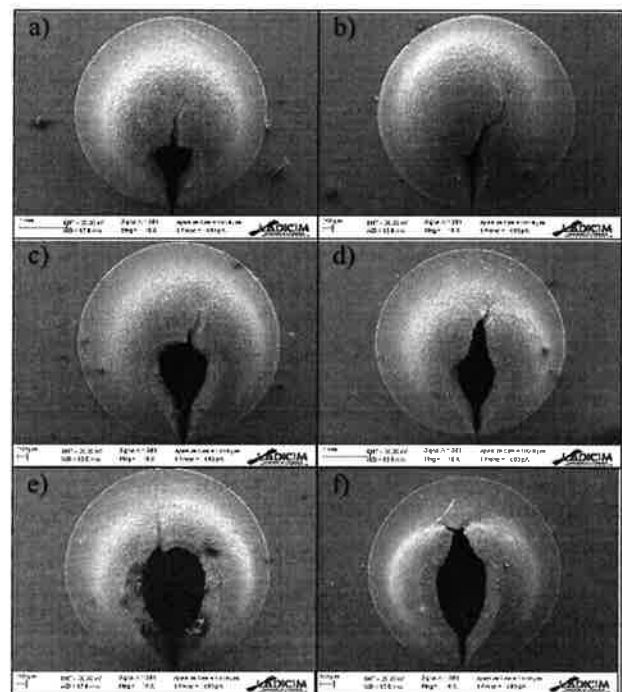


Figura 5. Fractografías de las probetas ensayadas: a) Entalla de longitud 4.07 mm, b) Fisura de longitud 4.16 mm, c) Entalla de longitud 4.54 mm, d) Fisura de longitud 4.64 mm, e) Entalla de longitud 4.98 mm, f) Fisura de longitud 5.105 mm.

En la Figura 6 se puede observar como la geometría de la entalla también tiene influencia en el desplazamiento del punzón correspondiente a la iniciación de la fisura, d_i . Por simplicidad del método, y dado que la iniciación de la fisura se suele producir en el punto de fuerza máxima o en puntos próximos tras haber alcanzado dicho valor, se ha decidido adoptar como iniciación de la fisura el punto correspondiente a fuerza máxima y no el quiebro de la curva Fuerza-Desplazamiento del punzón [8,9]. Se ha comprobado que el error cometido es menor del 10%, siempre por el lado de la seguridad.

Aplicando este método, en la Figura 6 se muestran los desplazamientos correspondientes a la iniciación de la fisura en función de la longitud del defecto. Se observa una ligera tendencia a valores menores de d_i cuanto mayor es la longitud del defecto, presentándose las mayores diferencias para aquellas probetas con menores longitudes de defecto. Este efecto es especialmente notable para la probeta con radio 0 mm y longitud de fisura 4.16 mm, de manera análoga al análisis de la influencia sobre la fuerza máxima alcanzada y posiblemente por causas similares.

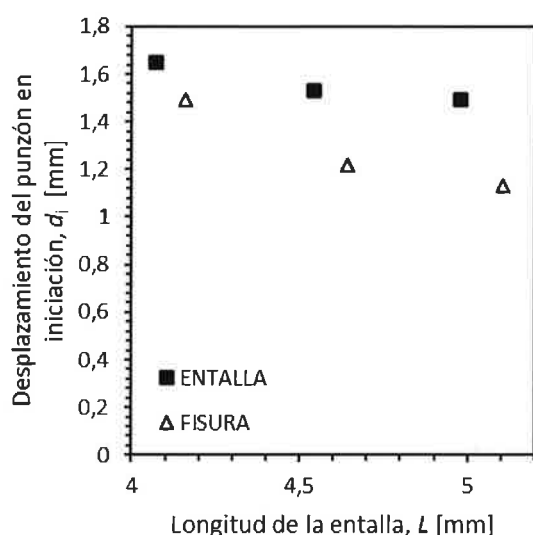


Figura 6. Relación entre el desplazamiento del punzón en el que se produce la iniciación de la fisura y la longitud del defecto aplicado, en función del radio del mismo (0 ó 0.15 mm).

Mediante la aplicación del método propuesto en [8,9], se ha obtenido el CTOD correspondiente a la iniciación de fisura para las entallas de radio 0.15 mm. Los resultados se muestran en la Figura 7. Se comprueba que, para las mayores longitudes de entalla, se obtienen valores prácticamente constantes, dada la dispersión propia de la tenacidad. Para la entalla de longitud 4.07 mm, en cambio, se obtiene un valor más reducido. Es necesario un análisis mediante simulaciones por elementos finitos para poder alcanzar un mayor grado de comprensión de este fenómeno, así como para poder analizar el CTOD en el caso de probetas con fisura.

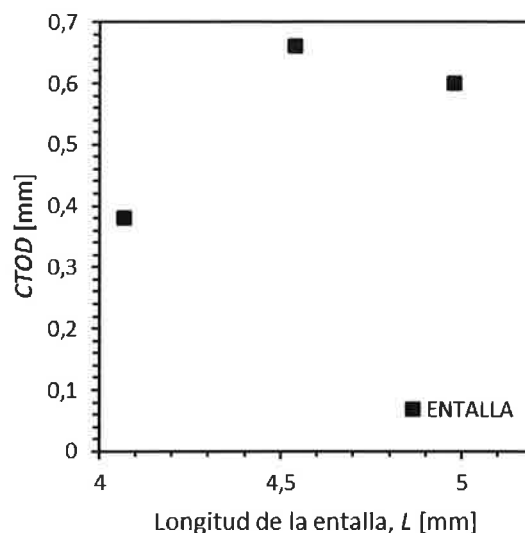


Figura 7. Relación entre el grado de enromamiento del defecto (CTOD) y la longitud del defecto aplicado, para un radio de 0.15 mm.

A partir de los resultados de CTOD en el momento de iniciación, y aplicando las ecuaciones (1) y (2) [10], es posible obtener las estimaciones de tenacidad a fractura, que se muestran en la Figura 8. Se comprueba que, de manera análoga a los valores de CTOD, se obtienen los mismos valores de tenacidad a fractura para las longitudes de entalla entre 4.5 y 5.0 mm, teniendo en cuenta la dispersión del fenómeno. Para el caso de la menor longitud de entalla, se obtiene un valor menor (20% menor), por el lado de la seguridad.

$$J_{ic} = \frac{CTOD \sigma_Y}{d_n} \quad (1)$$

$$K_{Jic} = \sqrt{\frac{E J_{ic}}{1 - \nu^2}} \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2), J_{ic} representa el valor de la integral J , σ_Y es el límite elástico, d_n es un factor adimensional dependiente de las propiedades a tracción del material [10], E representa el módulo de Young y ν es el coeficiente de Poisson.

Se han comparado las estimaciones obtenidas con el valor obtenido mediante ensayos convencionales, y se han calculado los coeficientes de seguridad de las estimaciones, que se muestran en la Figura 9. Se observa la idoneidad del método, obteniendo estimaciones por el lado de la seguridad, con valores en torno a un 25% inferiores a los obtenidos mediante métodos convencionales. Es importante tener en cuenta que incluso con el empleo de entallas más cortas, se obtienen valores conservadores de tenacidad, aunque con una mayor desviación. En trabajos posteriores se analizará en detalle dicho comportamiento, con el fin de poder

determinar de una manera fiable el tamaño mínimo de la entalla para obtener una estimación lo más próxima posible a los valores reales, siempre por el lado de la seguridad. En base a los resultados obtenidos en el acero S355J2, se ha comprobado la idoneidad y adecuación del método empleando entallas con una longitud entre 4.5 y 5.0 mm.

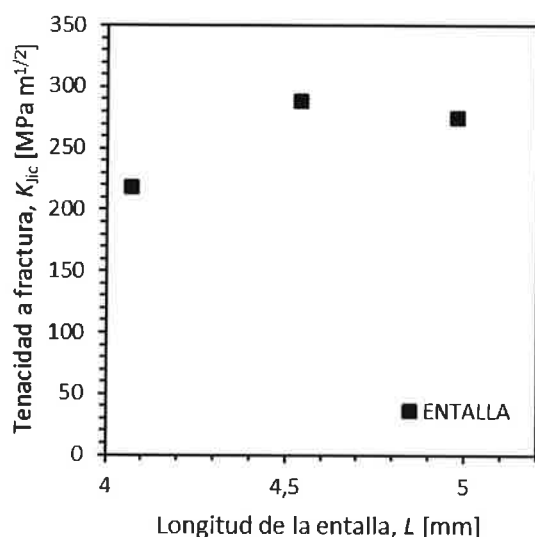


Figura 8. Relación entre la estimación de la tenacidad a fractura mediante ensayos SP y la longitud del defecto aplicado, para un radio de 0.15 mm.

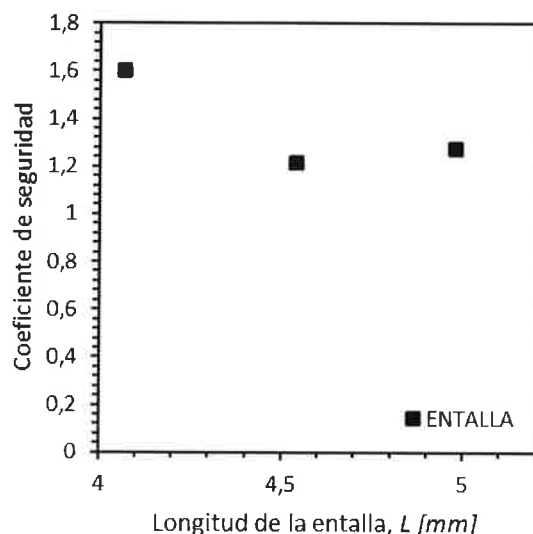


Figura 9. Relación entre el coeficiente de seguridad de las estimaciones y la longitud del defecto aplicado, para un radio de 0.15 mm.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia de la geometría de la entalla en las estimaciones de tenacidad a fractura, analizando su efecto en un acero estructural S355J2. Se ha comprobado que el método ofrece

resultados por el lado de la seguridad, independientemente de la longitud de la entalla empleada. Este hecho permite garantizar su aplicación en evaluaciones de integridad estructural de componentes reales, asegurando que en dichas evaluaciones se contará con un determinado factor de seguridad.

Además, se ha comprobado que el uso de entallas con radio 0.15 mm y con una longitud entre 4.5 y 5.0 mm permite la obtención de estimaciones precisas, con un coeficiente de seguridad de aproximadamente 1.25. Esto confirma la idoneidad y adecuación del método para su aplicación en evaluaciones de estructuras reales en presencia de fisuras. Se trata de una herramienta sencilla y económica que permite la realización de caracterizaciones locales de componentes en servicio con reducidos volúmenes de material o con geometrías complejas, una aplicación difícilmente abordable mediante otras técnicas convencionales o alternativas.

Por último, se plantea un análisis en detalle del efecto del uso de entallas cortas en las estimaciones de tenacidad a fractura en trabajos futuros, así como el desarrollo de simulaciones y ensayos que permitan alcanzar un mayor grado de conocimiento del uso de defectos con radio 0 mm (fisuras). Para proceder a la optimización de la entalla de manera independiente del material, se espera aplicar esta metodología no sólo en el acero S355J2, sino también en otros materiales con menor ductilidad, como la aleación de magnesio AJ62, cubriendo así un amplio espectro de comportamiento de los materiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la financiación recibida del proyecto MAT2014-58738-C3-3-R.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E8 / E8M-16^a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [2] ASTM E1820-17a, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- [3] R. Chaouadi, E. van Walle, M. Scibetta, R. Gérard. On the use of miniaturized CT specimens for fracture toughness characterization of RPV materials, *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference*, **PVP2016-63607**, 2016.

- [4] M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling. The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Postirradiation Mechanical Properties, *Journal of Nuclear Materials*, **103-104**, 1545-1550, 1981.
- [5] CWA 15627:2007, Small Punch Test Method for Metallic Materials, European Committee for Standardization, 2007.
- [6] M. Bruchhausen, T. Austin, S. Holmström, E. Altstadt, P. Dymáček, S. Jeffs, R. Lancaster, R. Lacalle, K. Matocha, J. Petzová. European Standard on Small Punch Testing of Metallic Materials, *Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*, **PVP2017-65396**, 2017.
- [7] S. Cicero, V. Madrazo, T. García, J. Cuervo, E. Ruiz. On the notch effect in load bearing capacity, apparent fracture toughness and fracture mechanisms of polymer PMMA, aluminium alloy Al7075-T651 and structural steels S275JR and S355J2, *Engineering Failure Analysis*, **29**, 108-121, 2013.
- [8] R. Lacalle, J.A. Álvarez, B. Arroyo, F. Gutiérrez-Solana. Methodology for fracture toughness estimation based on the use of Small Punch notched specimens and the CTOD concept, *Proceedings of the 2nd International Conference SSTT*, 2012.
- [9] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana. Use of small punch notched specimens in the determination of fracture toughness, *Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference*, **PVP2008-61537**, 1363-1369, 2008.
- [10] C.F. Shih. Relationship between the J-Integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **29**, 305-326, 1981.